

Title	Spectroscopic Studies of the Dynamic Solar Chromosphere: Spicules and Flares( Abstract_要旨 )
Author(s)	Tei, Akiko
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2020-03-23
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k22253">https://doi.org/10.14989/doctor.k22253</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

( 続紙 1 )

京都大学	博 士 ( 理 学 )	氏名	鄭 祥子
論文題目	Spectroscopic Studies of the Dynamic Solar Chromosphere: Spicules and Flares(太陽彩層のダイナミクスについての分光学的研究：スピキュールとフレア)		
(論文内容の要旨)			
<p>太陽の表面である光球(温度 6000K)と高温な外層大気であるコロナ(<math>10^6</math> K)の間には彩層(温度 <math>10^4</math> K)と呼ばれる大気層がある。彩層は磁場に関連した大気加熱や活動現象において重要な役割を果たすが、その詳細に迫るには彩層の微細で動的な現象を細かく分解して観測する必要がある。また、恒星大気や恒星フレアを理解するには、分光観測を通して太陽における物理的理解を応用することが期待される。2013 年に太陽撮像分光観測衛星である Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)が打ち上げられたことで、衛星による太陽彩層の高分解分光観測が実現した。本論文では、IRIS 分光観測で得られた彩層スペクトル線データを用いることで、第二章では静穏領域の彩層（スピキュール）の物理状態に、第三章では活動現象（太陽フレア）に見られる彩層の振る舞いに迫った。</p> <p>光球では上空に向かって温度が減少するのに対し、彩層では温度が増加し、彩層からコロナにかけては温度が一万度から百万度へと急激に増加する。彩層とコロナの加熱機構は太陽物理学における最大の謎の一つであり、彩層・コロナ加熱問題という。静穏領域の彩層を太陽縁付近で観測すると、光球とコロナをつなぐ細長い構造（スピキュール）が彩層を構成していることが分かる。彩層の加熱量はコロナの 10 倍であることが分かっており、彩層・コロナ加熱問題を解決するには、スピキュールの形成や性質を理解することが不可欠である。彩層スペクトル線の形成においては局所熱力学平衡（LTE）が成り立たないため、non-LTE を考慮した輻射輸送モデリングを用いて温度や密度、速度といった物理状態に制限を与える必要がある。第二章では、non-LTE 輻射輸送計算を用いることでスピキュールの分光観測で得られた Mg II 線の形成を理解することを試みた。その際、視線方向に多数のスピキュールが重なっていることを初めて考慮した。その結果、スピキュールが最大 25 km/s の視線方向の速さをもつと仮定すると中高度で観測された線プロファイルが再現できた。この結果は、撮像観測で得られるスピキュールの見かけの横揺れ運動（25 km/s）が実際の視線速度と同程度であることを分光観測から支持している。また、Mg II 線プロファイルが輻射輸送モデリングのパラメタに対してどのような依存性を持つかについても調査し、今後の物理状態特定への道筋をつけた。さらに、スピキュールに見られる Mg II 線プロファイルの明るさや幅などの特徴量を高さ毎に定量化することで、スピキュールの理論モデルが再現すべき観測側からの条件を提示した。</p> <p>太陽大気中での爆発現象を太陽フレアという。フレア領域の彩層では上空からのエネルギー注入による急激な加熱が起き、高温(<math>10^{6-7}</math> K)な上昇流とその底部での低温</p>			

( $10^4$  K)な下降流が発生すると考えられている。その結果、彩層スペクトル線は低温な下降流に起因して Red asymmetry と呼ばれる長波長側の増光を見せることが典型である。しかし、短波長側が増光する Blue asymmetry の観測例も少なからずあり、これも含めた太陽フレアのモデルは確立していなかった。第三章では、IRIS と飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡によるフレア領域の分光観測データを用いて彩層スペクトル線の時空間発展を調査した。その結果、Red asymmetry は使用した全ての彩層スペクトル線に共通して見られ、Mg II 線ではその直前に Blue asymmetry が見られた。また、観測された Mg II 線の Blue asymmetry プロファイルは低温( $10^4$  K)な上昇流の存在によって説明できることを示した。さらに、上空から非熱的な加速電子が彩層深部を急激に加熱し、高温プラズマがその上部の低温プラズマを持ち上げることでそのような低温上昇流が発生したという描像を新しく提案した。

(論文審査の結果の要旨)

太陽大気は内側から順に光球、彩層、コロナと呼ばれる。低温な光球と高温なコロナの中間に位置する彩層は、静穏領域においても活動現象においても大気のダイナミクスにとって重要な役割を果たす。しかし、その動的な物理状態を観測から追究するには、磁力線に沿った微細な構造を分解する必要がある。近年、Hinode衛星の打ち上げによって、宇宙空間からの安定した高分解撮像観測がなされ、彩層の形態学的な研究が進展した他、地上望遠鏡を用いた彩層の分光観測も実施されてきたが、IRIS衛星(Interface Region Imaging Spectrograph)が打ち上げられてからは、宇宙空間から、その高い空間・時間分解能によって彩層の分光学的な情報が取得できるようになった。

申請者は第二章において、分光観測と輻射輸送数値計算の両面からアプローチすることで、彩層・コロナ加熱問題の解明の鍵となるスピキュールの物理状態推定に向けた道筋をつけた。スピキュールが形成する彩層では局所熱力学平衡(LTE)が成り立たないため、分光観測で得られた彩層スペクトル線の理解を試みることで自体が挑戦的である。申請者は non-LTE を考慮した輻射輸送計算によって、スピキュールに見られるスペクトル線形成の基本的な理解をもたらした。すなわち、視線方向にスピキュールが多数重なっている状況をモデル化し、これによって観測される Mg II 線スペクトルが理解できることを世界で初めて示した。これより今後、より複雑なモデル化が可能となった点でも重要な成果である。また、申請者はこのモデル化において、スピキュールが最大 25 km/s の視線方向の速さを持つと仮定することでスピキュールの中高度に見られる線プロファイルが再現できることを示した。これは、Hinode の撮像観測で得られたスピキュールの見かけの横揺れ運動(25 km/s)と同程度であり、見かけの運動が実際の運動を反映していることを分光観測から示唆した点で重要な結果である。また、輻射輸送計算から、Mg II 線プロファイルの物理パラメタ依存性を調査しており、今後さらに使用するスペクトル線の種類を増やすことで、物理状態推定につながることを期待される。さらに申請者はスピキュールに見られる Mg II 線プロファイルの明るさや幅などの特徴量を高さ毎に定量化しており、これはスピキュールの理論モデルに観測からの制限を与えるものである。以上のように、申請者は分光学的手法を用いてスピキュールのモデル化を進め、その理解の進展に寄与した。彩層・コロナ加熱は太陽だけでなく恒星大気にも共通する問題であり、今後、分光観測を通じた恒星への応用も期待される。

第三章では、太陽大気中での爆発現象である太陽フレアにおける彩層のダイナミクスについて、観測から新たな描像を提案することに成功した。フレア領域では上空で解放されたエネルギーが磁力線に沿って彩層に注入されることで、彩層中に高密度な下降流が発生すると考えられてきた。しかし、申請者はIRISと飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡によるフレア領域の分光観測データの丁寧な解析から、彩層プラズマの上昇流の存在も示唆する結果を得た。さらに、そのような上昇流が非熱的な高エネルギー電子に起因する可能性を示した。申請者が発見した彩層スペクトル線の非対称性(Blue asymmetry)は恒星フレアを分光観測から理解するための糸口となりうる点でも意義がある。また、フレア領域に見られる白色光の増光の起源にも迫るものであり、今後のさらなる進展も見込まれる。

以上のように本博士論文における申請者の研究は、分光学的手法を用いて太陽の高温外層大気形成や太陽フレアの理解を深めたという点だけでなく、分光観測を通して太陽物理学を恒星物理学に応用するという観点でも意義があり、さらに今後の関連分野の進展に寄与するものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。また、令和2年1月17日に論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降